

## Лабораторная работа № 1

### Определение фокусных расстояний линз

**Цель работы:** определить фокусные расстояния и оптические силы собирающей и рассеивающей линз.

**Оборудование:** осветитель, стеклянная пластина с изображением квадрата с диагональю, собирающая и рассеивающая линзы, лента измерительная металлическая, оптическая скамья, экран, центральная и краевая диафрагмы.

#### Теоретическое введение

Оптические системы (линзы<sup>1</sup>, сложные объективы, состоящие из нескольких линз) характеризуются рядом кардинальных величин (рис. 1.1).

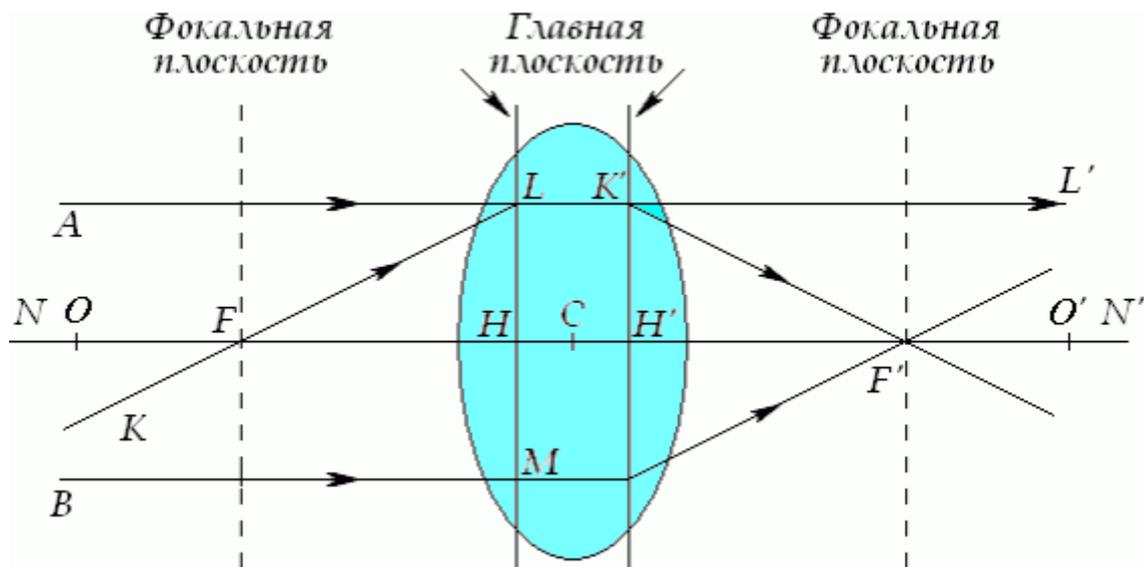


Рис. 1.1. Оптическая система и её кардинальные величины

*Оптическим центром линзы* называется точка  $C$ , проходя через которую, луч не изменяет своего направления.

*Главная оптическая ось  $NN'$*  – прямая, проходящая через центры кривизны  $O$  и  $O'$  поверхностей, ограничивающих линзу или несколько линз (центрированная система).

*Главный фокус  $F$*  определяется тем, что пучок лучей, входящих в систему от точки  $F$ , выйдет из системы в виде пучка, параллельного главной оптической оси. Следовательно, если луч  $KL$  проходит через фокус, то вышедший из системы луч  $K'L'$  параллелен главной оптической оси. Лучи  $AL$  и  $BM$ , параллельные главной оптической оси, можно рассматривать, как выходящие из бесконечно удалённой точки, находящейся на оптической оси слева. Пройдя через систему, они

<sup>1</sup> Линза (нем. *Linse*, от лат. *lens* – чечевица) – деталь из оптически прозрачного однородного материала, ограниченная двумя полированными преломляющими поверхностями вращения.

соберутся в точке  $F'$ , лежащей на главной оптической оси. Точка  $F'$  является вторым главным фокусом системы.

Плоскости, проведённые через главные фокусы  $F$  и  $F'$  перпендикулярно главной оптической оси  $NN'$ , называются *фокальными плоскостями* системы.

Внутри оптической системы существуют две главные плоскости, которые являются сопряжёнными и взаимно преобразуются друг в друга с увеличением, равным 1. Главные плоскости параллельны друг другу и фокальным плоскостям системы.

Точки пересечения  $H$  и  $H'$  главных плоскостей системы с главной оптической осью носят название главных точек системы. Расстояния от главных точек до главных фокусов называются *фокусными расстояниями* ( $FH$  и  $F'H'$ ). Данные расстояния обозначаются также  $F$ .

### Тонкие линзы

Простейшими оптическими системами являются тонкие линзы. Линза считается тонкой, если можно пренебречь её толщиной по сравнению с величиной радиусов кривизны поверхностей, ограничивающих линзу, и фокусными расстояниями.

Тогда вершины ограничивающих поверхностей и главные точки ( $H$  и  $H'$ ) для тонких линз можно считать совпадающими между собой и расположенными в оптическом центре  $C$ .

Для тонкой линзы фокусное расстояние отсчитывается от оптического центра.

Тонкая линза имеет одну главную плоскость, общую для обеих поверхностей линзы и проходящую через оптический центр перпендикулярно главной оптической оси.

Фокусное расстояние тонкой линзы связано с радиусами кривизны, ограничивающими её сферические поверхности  $r_1$  и  $r_2$  следующим соотношением

$$\frac{1}{F} = \left( \frac{n_L}{n} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (1.1)$$

где  $n_L$  – показатель преломления материала линзы,  $n$  – показатель преломления окружающей среды,  $r$  – радиусы кривизны поверхностей линзы, взятые со знаком (или координаты центров кривизны).

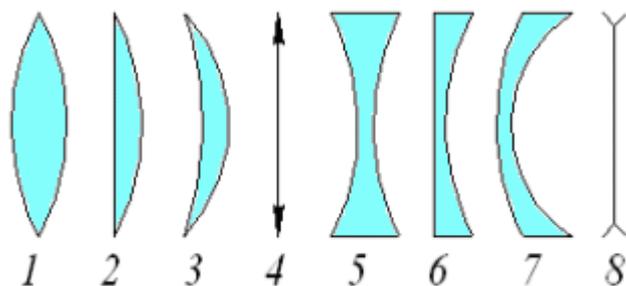


Рис. 1.2

- Линзы: 1 – двояковыпуклая,  
 2 – плосковыпуклая,  
 3 – вогнуто-выпуклая,  
 4 – собирающая (обозначение),  
 5 – двояковогнутая,  
 6 – плосковогнутая,  
 7 – выпукло-вогнутая,  
 8 – рассеивающая (обозначение).

Если показатель преломления материала линзы больше показателя преломления окружающей среды, то утончающиеся от центра к краям линзы являются собирающими (положительными). Рассеивающие (отрицательные) линзы утончаются к центру.

Если показатель преломления материала линзы меньше показателя преломления окружающей среды, то классификация линз будет обратной.

*Внимание! Во всех формулах расстояние, отсчитанное вправо от центра линзы – положительно, отсчитанное влево – отрицательно<sup>2</sup>. Предмет (источник света) – слева. Первая поверхность – слева.*

Таким образом, для линзы на рис. 1.3а  $r_1 > 0$ , и  $r_2 < 0$ , следовательно,  $F > 0$ .

Для линзы на рис. 1.3б

$r_1 < 0$ , и  $r_2 > 0$ , следовательно,  $F < 0$ .

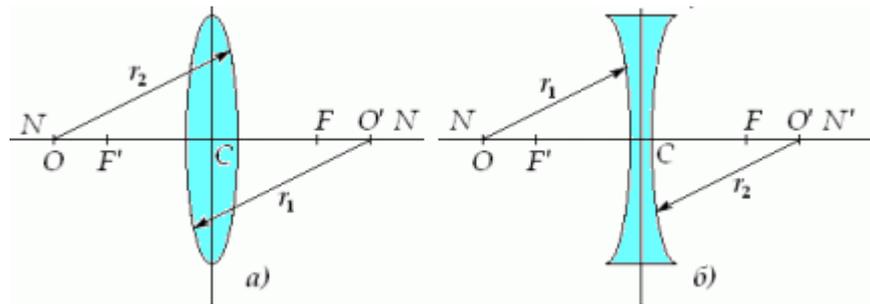


Рис. 1.3. Собирающая и рассеивающая линзы

Оптической силой линзы называется величина, обратная фокусному расстоянию

$$D = \frac{1}{F}. \quad (1.2)$$

Измеряется в диоптриях<sup>3</sup> (дптр). Оптическая сила собирающих линз – положительна, а рассеивающих – отрицательна.

Для рисунка 1.2 (если  $n_L > n$ ) из (1.1) следует:

1-двояковыпуклая	$r_1 > 0$	$r_2 < 0$		$F > 0$	$D > 0$
2-плосковыпуклая	$r_1 \rightarrow \infty$	$r_2 < 0$		$F > 0$	$D > 0$
3-вогнуто-выпуклая	$r_1 < 0$	$r_2 < 0$	$ r_2  <  r_1 $	$F > 0$	$D > 0$
5-двояковогнутая	$r_1 < 0$	$r_2 > 0$		$F < 0$	$D < 0$
6-плосковогнутая	$r_1 \rightarrow \infty$	$r_2 > 0$		$F < 0$	$D < 0$
7-выпукло-вогнутая	$r_1 > 0$	$r_2 > 0$	$ r_2  <  r_1 $	$F < 0$	$D < 0$

Если на тонкую собирающую линзу падает пучок параллельных монохроматических лучей, то после прохождения через линзу все лучи пересекутся в главном или побочных фокусах линзы, расположенных в фокальной плоскости.

<sup>2</sup> Вспомните понятие координаты.

<sup>3</sup> Диоптрия (греч. диоптров) – приспособление (зеркало) для наведения на предмет, на цель.

Если же пучок лучей падает на тонкую рассеивающую линзу, то после прохождения через линзу он превращается в пучок расходящихся лучей, продолжения которых пересекаются в соответствующем главном или побочном фокусах линзы, расположенных в фокальной плоскости. Поэтому фокусы собирающей линзы называют действительными, а рассеивающей – мнимыми.

Тонкая линза даёт неискажённое изображение предмета, если через неё проходит монохроматический свет от небольшого и достаточно удалённого от неё предмета (параксиальные лучи).

Изображения, получаемые с помощью реальных линз, имеют разнообразные искажения (абберации). Для устранения или уменьшения искажений используют группы разных линз, называемые оптическими системами. К ним относятся объективы и окуляры фотоаппаратов, проекторов, микроскопов, телескопов, биноклей и других приборов.

Если известно фокусное расстояние тонкой линзы, то изображение предмета может быть найдено путём простых геометрических построений. Необходимо построить изображения каждой его точки, но, как правило, достаточно построить изображения крайних точек предмета.

Для построения изображения какой-либо точки предмета, необходимо выбрать, как минимум, два луча, исходящие из этой точки, направления которых точно известны после их прохождения через линзу. Точка пересечения лучей или их продолжений после прохождения через линзу и будет служить изображением точки предмета.

В качестве таких лучей используют:

- лучи, проходящие через оптический центр линзы, не меняют своего направления;
- лучи, проходящие через главный фокус линзы, после преломления в линзе будут параллельны главной оптической оси;
- лучи, параллельные главной оптической оси, после прохождения через линзу пройдут через её главный фокус.

Примеры построения изображений в собирающей и рассеивающей линзах даны на рис. 1.4.

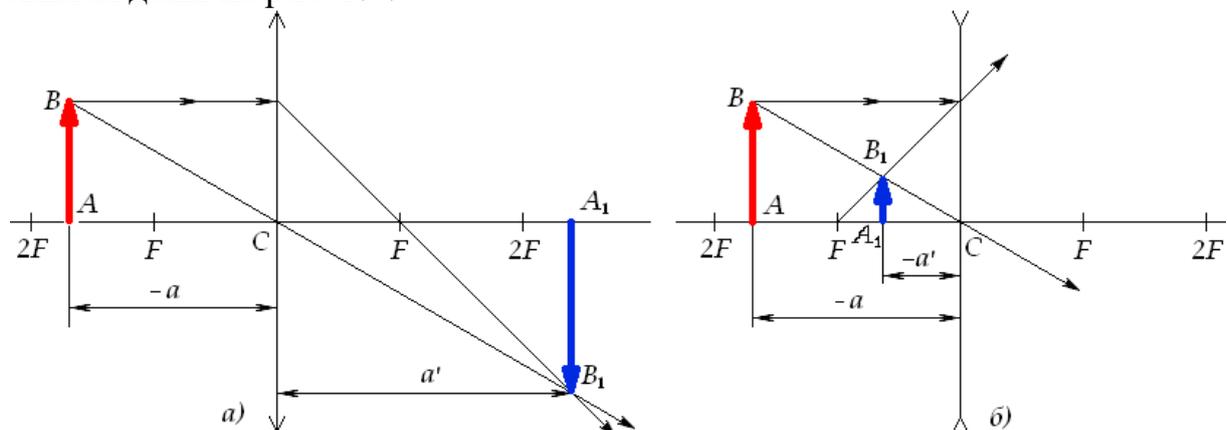


Рис. 1.4. Построение изображений в тонкой линзе

По формуле тонкой линзы положения предмета и его изображения связаны соотношением

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{F}, \text{ откуда } a' = \frac{Fa}{F+a} = \frac{F|a|}{|a|-F}, \quad (1.3)$$

где  $F$  – фокусное расстояние линзы, взятое со знаком,  $a$  – расстояние от линзы до предмета ( $a < 0$ , если предмет расположен слева от линзы),  $a'$  – расстояние от линзы до изображения ( $a' < 0$ , если изображение расположено слева от линзы).

Линейным поперечным увеличением  $\Gamma$  тонкой линзы или оптической системы называется отношение величины изображения  $H$  к величине предмета  $h$  в плоскостях, перпендикулярных оптической оси. Часто берётся со знаком.

Для тонкой линзы из подобия треугольников на рисунке 1.4 следует

$$\frac{H}{h} = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{a'}{a} = \frac{Fa}{(a+F)a} = \frac{F}{a+F} = \frac{a'(F-a')}{a'F} = \frac{F-a'}{F}. \quad (1.4)$$

### Описание установки

Установка (Рис. 1.5) состоит из оптической скамьи 1 с рейтерами и расположенной рядом измерительной лентой. На рейтерах закреплены: осветитель 2, на матовом стекле которого чёрной тушью нарисован квадрат с диагональю, оправка для установки линз 3 с центральной и краевой диафрагмами и белый экран 4.

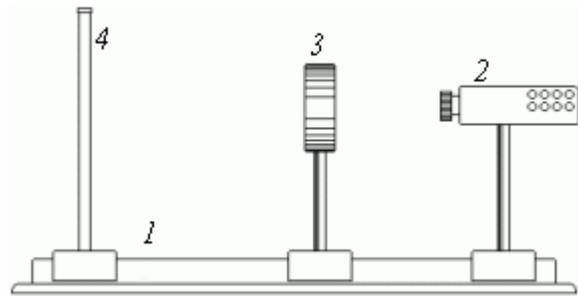


Рис. 1.5. Схема установки

Осветитель соединён с источником напряжения, который подключается к сети переменного тока напряжением 220 В.

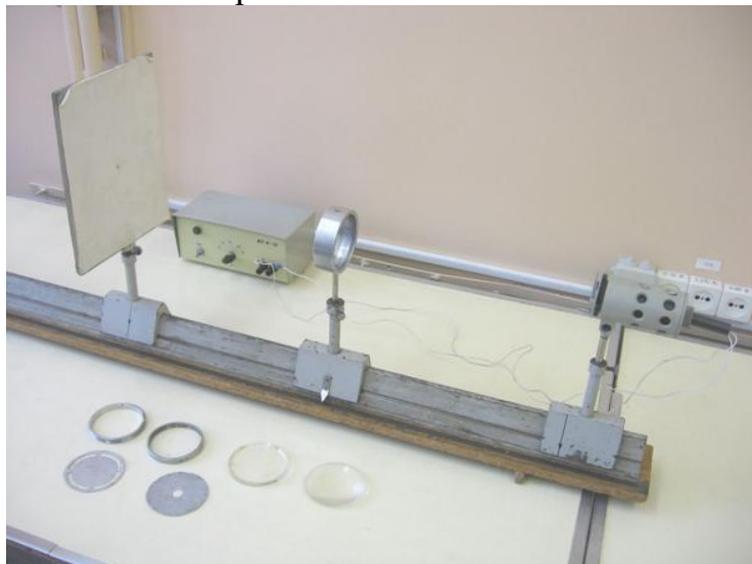


Рис. 1.6. Общий вид установки

## Методика выполнения работы

### I. Определение фокусного расстояния тонкой собирающей линзы

1. Установить в оправу 3 собирающую линзу и компенсирующее кольцо.
2. Установить осветитель и линзу на одинаковой высоте по центру экрана и **выровнять** все устройства по оптической оси.
3. Установить максимально возможное расстояние между экраном и осветителем и, перемещая по оптической скамье линзу, получить резкое изображение предмета (квадрата) на экране.
4. Измерить расстояние от линзы до предмета  $a$  и до изображения на экране  $a'$ . Обратите внимание на положение линзы в оправе.
5. Измерить линейкой сторону квадрата и его диагональ на матовом стекле  $(x, y)$  и на экране  $(x', y')$ . Результаты п.4 и п.5 внести в таблицу 1.
6. Повторить пп. 3-5 ещё 2 раза, уменьшая расстояние между экраном и осветителем и получая в итоге увеличенное, уменьшенное и примерно равновеликое изображения.
7. Рассчитать фокусное расстояние линзы для каждого случая по формулам, полученным из (1.3) и (1.4)

$$F_1 = \frac{|a|a'}{|a|+a'}, F_2 = \frac{xa'}{x+|x'|}, F_3 = \frac{ya'}{y+|y'|}, F_4 = \frac{|x'||a|}{x+|x'|}, F_5 = \frac{|y'||a|}{y+|y'|}. \quad (1.5)$$

8. Определить средние значения  $\overline{F}_1, \overline{F}_2, \overline{F}_3, \overline{F}_4, \overline{F}_5$ . Оценить погрешности.
9. Сравнить результаты. Найти среднее значение  $F$  по всем данным.
- 10<sup>\*4</sup>. Для  $F_1$  рассчитать погрешности, как для косвенных измерений.

### II. Определение фокусного расстояния линзы по способу Бесселя

1. Установить расстояние между осветителем и экраном  $L$ , превышающее  $4F$  (значение  $F$  взять из результатов предыдущих измерений).
2. Перемещая линзу между осветителем и экраном, найти два таких положения линзы, при которых получается резкое изображение квадрата на экране (в одном случае – уменьшенное, в другом – увеличенное).
3. Измерить расстояние между двумя положениями линзы  $z$ , результаты внести в таблицу 2, и рассчитать  $F$  по формуле

$$F = \frac{L^2 - z^2}{4L}. \quad (1.6)$$

4. Повторить пп. 1-3 ещё для двух значений  $L$ . Результаты внести в таблицу 2.
5. Рассчитать среднее значение фокусного расстояния. Оценить относительную и абсолютную погрешности.
6. Сравнить результат с заданием I. Сделать выводы.
- 7\*. Для каждого случая рассчитать относительную и абсолютную погрешности, как для косвенных измерений.

---

<sup>4</sup> Дополнительное задание для студентов физических специальностей.

### III. Определение фокусного расстояния собирающей линзы с диафрагмами

1. Установить на линзу сначала центральную, а потом краевую диафрагмы и по способу Бесселя определить фокусные расстояния для центральных и нецентральных пучков лучей не менее чем для трёх расстояний в каждом случае. Результаты внести в таблицу 3.
2. Рассчитать средние значения фокусного расстояния. Оценить относительную и абсолютную погрешности.
3. Сравнить результат с заданиями I и II. Сделать выводы.

### IV. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

Рассеивающая линза имеет мнимые фокусы. Определить их положение и вычислить  $F$  можно с помощью системы, состоящей из собирающей и рассеивающей линз, находящихся в одной оправе вплотную друг к другу. В этом случае оптическая сила системы линз  $D_{сист} = D_{соб} + D_{рас}$ , причём, для получения действительного изображения необходимо, чтобы  $D_{соб} > |D_{рас}|$ . Из (1.2)

$$F_{рас} = \frac{F_{соб} F_{сист}}{F_{соб} - F_{сист}}, \quad (1.7)$$

где  $F_{сист}$  – фокусное расстояние системы линз,  $F_{соб}$  – фокусное расстояние собирающей линзы,  $F_{рас}$  – фокусное расстояние рассеивающей линзы.

1. Установить в оправе собирающую и рассеивающую линзы вместе.
2. Определить фокусное расстояние системы  $F_{сист}$  по способу Бесселя для трёх различных значений  $L$ . Результаты внести в таблицу 4. Рассчитать среднее значение фокусного расстояния системы и его погрешности.
3. Рассчитать фокусное расстояние рассеивающей линзы по формуле (1.7), используя фокусное расстояние собирающей линзы из задания II. Оценить погрешности.
4. Рассчитать по формуле (1.2) оптические силы собирающей и рассеивающей линз. Оценить погрешности.

### V. Оценка оптической силы собирающей линзы по её геометрическим размерам

Из формулы (1.1), считая, что  $n = 1$ , и радиусы кривизны одинаковы, получаем

$$D = \frac{2(n_L - 1)}{r}. \quad (1.8)$$

Из рисунка (1.7) видно, что

$$r^2 = \frac{d^2}{4} + (r - h)^2, \quad 0 = \frac{d^2}{4} - 2hr + h^2, \quad r = \frac{\frac{d^2}{4} + h^2}{2h} = \frac{d^2}{8h} + \frac{h}{2}.$$

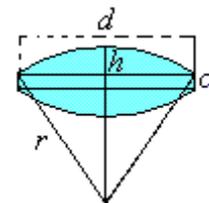


Рис. 1.7

1. Измерить штангенциркулем диаметр линзы  $d$ .
2. Измерить штангенциркулем общую толщину линзы, толщину центральной части  $s$ , вычесть, поделить пополам и получить величину  $h$ .
3. Рассчитать радиус линзы.
4. Считая, что  $n_L = 1,55$ , рассчитать её оптическую силу. Сравнить с ранее полученным результатом.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называют главной оптической осью линзы?
2. Какие точки называются главными фокусами, главными точками, оптическим центром линзы?
3. Какие плоскости называются главными плоскостями, фокальными плоскостями?
4. Как осуществляется построение изображений предметов, полученных с помощью тонких линз?
5. Перечислить методы определения фокусных расстояний линз.
6. Как определить фокусное расстояние рассеивающей линзы?
7. Какую величину называют линейным увеличением линзы?
8. построить изображение предмета в тонкой линзе (по заданию преподавателя)

### **Литература**

(см. список литературы)

**Лабораторная работа № 1. Лист отчёта**  
**Определение фокусных расстояний линз**

Выполнил студент \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_  
 Проверил \_\_\_\_\_  
 Показания сняты \_\_\_\_\_  
 Зачтено \_\_\_\_\_

Погрешности измерительных приборов.  $\alpha = \underline{\hspace{2cm}}\%$

Измерительный прибор	$\omega$ – цена деления	$\Delta_{\text{окр}}$ – округления	$\Delta_{\text{пр}}$ – приборная	$\Delta_{\text{суб}}$ – субъективная	Единицы измерения
Измерительная лента	1			5	мм

*Примечание: большая субъективная погрешность связана с субъективным понятием резкости изображения.*

**I. Определение фокусного расстояния тонкой собирающей линзы**

Таблица 1

№ п/п	$ a $ , мм	$a'$ , мм	$x$ , мм	$y$ , мм	$ x' $ , мм	$ y' $ , мм	$F_1$ , мм	$F_2$ , мм	$F_3$ , мм	$F_4$ , мм	$F_5$ , мм
1											
2											
3											
средние значения											
Относительные погрешности											

Продолжение таблицы 1

Статистические погрешности

$\Delta F_1$ , мм	$\Delta F_2$ , мм	$\Delta F_3$ , мм	$\Delta F_4$ , мм	$\Delta F_5$ , мм

Погрешности при косвенных измерениях

$\Delta F_1$ , мм	$\varepsilon_{F_1}$ , %

Среднее статистическое значение по всем измерениям  $F_{cp} = \underline{\hspace{2cm}} \pm \underline{\hspace{2cm}}$  мм,  $\varepsilon_F = \underline{\hspace{2cm}}\%$ .

Среднее значение  $F_1$  по косвенным измерениям  $F_1 = \underline{\hspace{2cm}} \pm \underline{\hspace{2cm}}$  мм,  $\varepsilon_{F_1} = \underline{\hspace{2cm}}\%$ .

**II. Определение фокусного расстояния линзы по способу Бесселя**

Таблица 2

Погрешности при

Стат. погрешности косвенных измерений

№ п/п	$L$ , мм	$z$ , мм	$F$ , мм	$\Delta F$ , мм	$\Delta F$ , мм	$\varepsilon_F$ , %
1						
2						
3						
среднее значение					$\varepsilon_F = \underline{\hspace{2cm}}\%$	

### III. Определение фокусного расстояния собирающей линзы с диафрагмами

Таблица 3

№ п/п	центральная диафрагма				краевая диафрагма			
	$L$ , мм	$z$ , мм	$F$ , мм	$\Delta F$ , мм	$L$ , мм	$z$ , мм	$F$ , мм	$\Delta F$ , мм
1								
2								
3								
	среднее значение				среднее значение			

### IV. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

Таблица 4

Погрешности при

косвенных измерениях

№ п/п	$L$ , мм	$z$ , мм	$F_{сис}$ , мм	$\Delta F_{сис}$ , мм	Стат. погрешности	косвенных измерениях	
						$\Delta F_{сис}$ , мм	$\varepsilon_F$ , %
1							
2							
3							
	среднее значение				$\varepsilon_F =$ %		

ИТОГИ:

$$F_{собр} = \text{---} \pm \text{---} \text{ мм}, \quad \varepsilon_F = \text{---} \%$$

$$F_{сис} = \text{---} \pm \text{---} \text{ мм}, \quad \varepsilon_F = \text{---} \%$$

$$F_{рас} = \text{---} \pm \text{---} \text{ мм}, \quad \varepsilon_F = \text{---} \%$$

$$D_{собр} = \text{---} \pm \text{---} \text{ дптр}, \quad \varepsilon_D = \text{---} \%$$

$$D_{сис} = \text{---} \pm \text{---} \text{ дптр}, \quad \varepsilon_D = \text{---} \%$$

$$D_{рас} = \text{---} \pm \text{---} \text{ дптр}, \quad \varepsilon_D = \text{---} \%$$

### V. Оценка оптической силы собирающей линзы по её геометрическим размерам

Таблица 5

$d =$		мм
$c+2h =$		мм
$c =$		мм
$h =$		мм
$r =$		мм
$n =$	1,55	
$D =$		дптр
$F =$		мм